

УДК 537.32

Анатычук Л.И.^{1,2}, Кобылянский Р.Р.^{1,2}, Константинович И.А.^{1,2},
Лысько В.В.^{1,2}, Пуганцева Е.В.^{1,2}, Розвер Ю.Ю.^{1,2}, Тюменцев В.А.^{1,2}

¹ Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины,
ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина;

² Черновицкий национальный университет им. Юрия Федьковича,
ул. Коцюбинського, 2, Черновцы, 58012, Украина

СТЕНД ДЛЯ ГРАДУИРОВКИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА

В работе приведены результаты разработки стенда для градуировки термоэлектрических преобразователей теплового потока (ПТП) и исследования их метрологических характеристик. Разработаны методики градуировки одного и одновременно двух преобразователей. Разработан и изготовлен новый тип термоэлектрических преобразователей с одновременным измерением температуры и теплового потока поверхности тела человека.

Ключевые слова: стенд для градуировки, термоэлектрический преобразователь, тепловой поток, вольт-ваттная чувствительность.

The results of development of the calibration bench for thermoelectric converters of the heat flux as well as their metrological characteristics analysis are provided in this paper. The calibration methods for one and two converters at a time were developed. The thermoelectric converter of a new type with simultaneous temperature and the heat flux measurements on the human body surface was developed and manufactured.

Key words: calibration bench, thermoelectric converter, heat flux, volt-watt sensitivity

Введение

Для определения локального тепловыделения поверхности тела человека перспективными являются термоэлектрические преобразователи [1 – 4]. Современные термоэлектрические преобразователи теплового потока (ПТП), которые изготовлены на основе высокоэффективных полупроводниковых материалов, характеризуются высокой чувствительностью, быстрым действием, технологичностью, оптимальными массо-габаритными параметрами, высокой надежностью и низкой стоимостью [5 – 9]. Такие преобразователи являются неприязательными в обслуживании и могут осуществлять круглосуточный мониторинг как тепловыделения организма человека [10 – 16], так и потерь тепла на отдаленных теплотрассах.

Актуальным является вопрос градуировки термоэлектрических преобразователей теплового потока, которые используются в приборах для измерения интегральных тепловых потоков биологических объектов, потерь через строительные конструкции, теплозащитные покрытия и на участках теплотрасс. По обыкновению градуировка таких преобразователей проводится абсолютным методом с использованием компенсационного нагревателя и

дифференциальных измерительных термопар, которые являются индикатором нулевого перепада температур [17, 18]. Однако такая градуировка нуждается в повышении точности измерений, поскольку такие преобразователи являются средствами измерительной техники. Повысить точность можно с помощью использования вспомогательного высокочувствительного термоэлектрического преобразователя теплового потока [19 – 21].

Поэтому целью данной работы является разработка стенда для градуировки термоэлектрических преобразователей теплового потока усовершенствованным методом и исследование метрологических характеристик таких преобразователей.

Конструкция стенда для градуировки ПТП

Для исследования метрологических характеристик и градуировки термоэлектрических ПТП в диапазоне температур $-30\text{ }^{\circ}\text{C} \div +130\text{ }^{\circ}\text{C}$ был разработан стенд, который приведен на рис. 1.

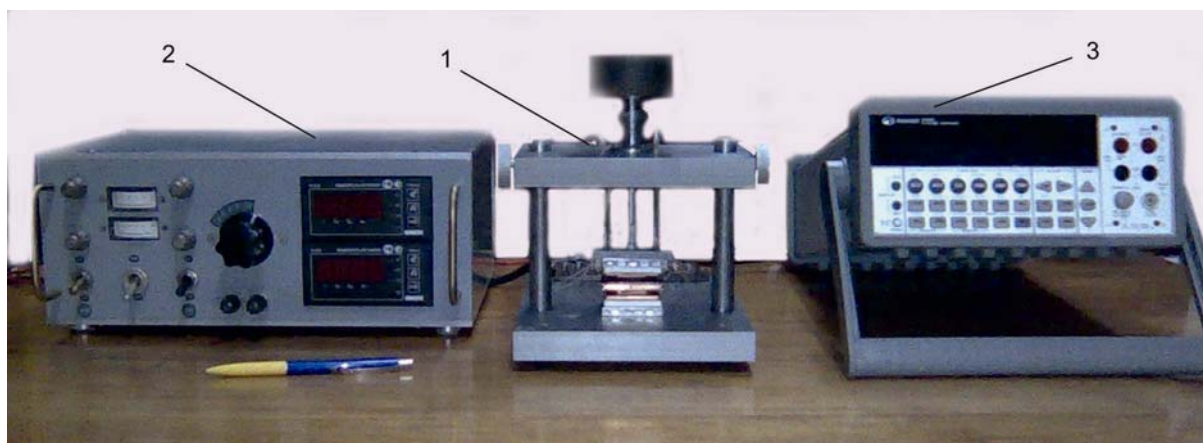


Рис. 1. Внешний вид стенда для исследования метрологических характеристик и градуировки ПТП.

Стенд состоит из измерительного блока 1, блока управления 2 и измерительного прибора 3 (высокоточный цифровой мультиметр).

В свою очередь, измерительный блок 1 содержит алюминиевую платформу, на которой размещены жидкостные теплообменники, устройство прижима и коммутационная колодка. Между горячим и холодными теплообменниками может размещаться один или два исследуемых ПТП.

Схематично измерительный блок 1 изображен на рис. 2. Как видно из рис. 1 и рис. 2, на нижней основе алюминиевой платформы и на подвеске верхней основы измерительного блока 1 закреплены два идентичных теплообменных узла, которые предназначены для отвода тепла – холодные теплообменники. Эти теплообменники реверсные, поскольку созданы на основе термоэлектрических охладителей (ТЭО) с жидкостным отводом отработанного тепла и могут работать как в режиме охлаждения, так и в режиме нагрева в зависимости от направления электрического тока. На рабочей стороне ТЭО закреплены медные тепловыравнивающие пластины с вмонтированными датчиками температуры – платиновыми термометрами сопротивления. Эти пластины в центральной своей части имеют отшлифованную с высоким классом чистоты плоскую поверхность – рабочую площадку. На этой площадке размещают исследуемый ПТП. Другая сторона ПТП контактирует с горячим теплообменником – плоским

нагревателем, который имеет две (верхнюю и нижнюю) отшлифованные рабочие поверхности. Плоский нагреватель изготовлен довольно тонким, чтобы его боковая поверхность была по возможности меньшей и он хорошо прогревался по всему своему объему. В корпусе этого нагревателя вмонтирован также датчик температуры – платиновый термометр сопротивления. Использование платиновых датчиков температуры дает возможность измерять и поддерживать температуры рабочих площадок теплообменников с помощью терморегуляторов с точностью, не меньшей ± 0.1 °С в диапазоне температур $-30 \div +130$ °С.

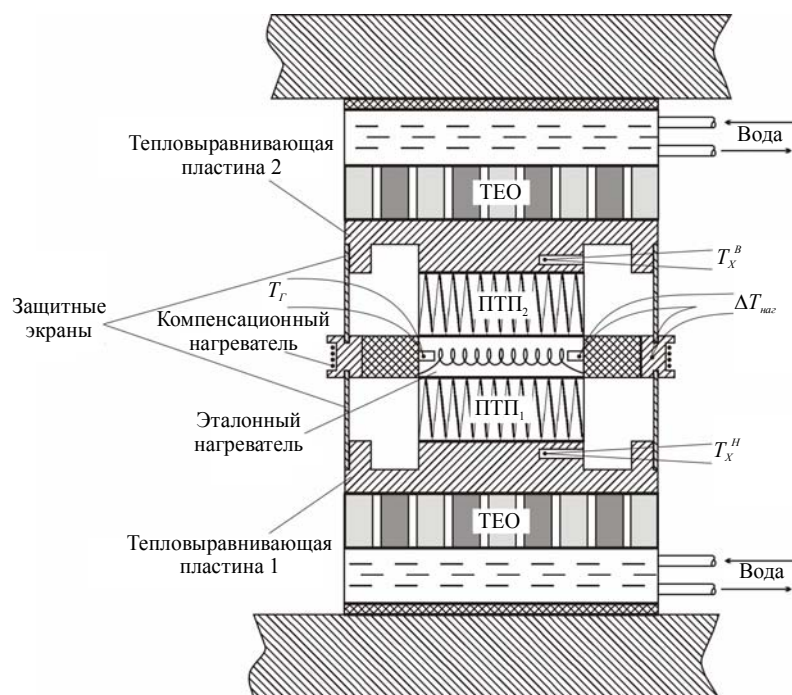


Рис. 2. Схема измерительного блока стенда для градуировки ПТП.

Поскольку боковая поверхность горячего теплообменника не принимает участия в теплообменных процессах с ПТП и с ней неизбежно возможны потери тепла, то для предотвращения этих потерь вокруг его боковой поверхности смонтирован кольцевой защитный нагреватель. Основная задача этого кольцевого нагревателя – поддерживать температуру, которая бы соответствовала температуре горячего теплообменника. Это достигается с помощью дифференциальной термопары, подсоединенной к свободному каналу терморегулятора, настроенного таким образом, что подача соответствующего напряжения питания на нагреватель кольцевой защитной печи приводит к нулевому сигналу этой термопары. Таким образом, достигается адиабатическая изоляция боковой поверхности горячего теплообменника.

Кольцевой защитный нагреватель выполняет еще одну важную роль. Он передает свою температуру защитному экрану, который расположен напротив боковой поверхности исследуемого ПТП. На нижней (и верхней) поверхностях кольцевого защитного нагревателя сделаны профрезерованные канавки, куда входят "горячие" торцы защитных экранов. Другие, "холодные" торцы этих экранов находятся в тепловом контакте с рабочими площадками холодных теплообменников. Таким образом, на поверхностях защитных экранов в вертикальном направлении создается градиент температуры, который соответствует температуре на боковой поверхности ПТП. Благодаря этому с боковой поверхности ПТП при

его градуировке не рассеивается тепло в окружающую среду.

В стенде два холодных теплообменника применяются для парной сравнительной градуировки одновременно двух ПТП. При градуировке одного ПТП незадействованный холодный теплообменник используется как еще один защитный нагреватель, на котором с помощью терморегулятора выставляется температура горячего теплообменника и, таким образом, осуществляется адиабатическая защита от тепловых потерь с незадействованной поверхности нагревателя горячего теплообменника. Руководит процессом термостатирования всех теплообменников блок управления 2, который содержит регулированные блоки питания для ТЭО и нагревателей, два двухканальных микропроцессорных терморегулятора РЕ-202, коммутационные элементы и контрольные клеммы измерений.

Все выводы электрических компонентов из измерительного блока 1 сходятся на клеммной колодке и с помощью кабеля подключаются к блоку управления 2. К блоку управления подключен также измерительный прибор – высокоточный цифровой мультиметр М3500 с возможностью передачи результатов измерений на персональный компьютер в реальном времени. Таким образом, разработанный стенд дает возможность проводить градуировку термоэлектрических ПТП и исследовать в динамике их метрологические характеристики.

Методика градуировки одного ПТП

С помощью разработанного стенда (рис. 1) градуировка одного термоэлектрического ПТП осуществляется по следующей методике:

- присоединить измерительный блок 1 к блоку управления 2;
- присоединить входной кабель измерительного прибора 3 к соответствующим клеммам блока управления 2;
- присоединить шланги жидкостного охлаждения ТЭО к водопроводной магистрали, открыть кран и пустить воду по системе охлаждения;
- поднять и зафиксировать в верхнем положении верхний холодный теплообменник;
- установить исследуемый ПТП на рабочей площадке нижнего холодного теплообменника;
- присоединить выводы исследуемого ПТП к соответствующим клеммам коммутационной колодки;
- установить нижний защитный экран;
- установить горячий теплообменник с защитным кольцевым нагревателем на ПТП и на верхний торец защитного экрана;
- установить верхний защитный экран;
- опустить верхний холодный теплообменник таким образом, чтобы он сел своей тепловыравнивающей пластиной на верхний защитный экран. При этом усилие прижима определяются навесками;
- на терморегуляторах блока управления 2 выставить температуру нижнего холодного теплообменника;
- переключатель измерений на блоке управления 2 поставить в положение "Напряжение нагревателя", включить измерительный прибор 3, переключить его в режим "Напряжение постоянного тока" с диапазоном "Автоматически" и из выражения

$$W = U^2 / R, \quad (1)$$

(где R – сопротивление нагревателя) определить напряжение и выставить его на нагревателе

горячего теплообменника, который бы соответствовал необходимой электрической мощности из диапазона 10 мВт – 1 Вт;

- по показанию "температура горячего теплообменника" на соответствующем канале терморегулятора, который работает в режиме измерителя температуры, при выходе этой температуры на стационарный режим, выставить такое же значение температуры на верхнем холодном теплообменнике. При этом температура кольцевого нагревателя поддерживается автоматически;

- переключатель блока управления 2 выставить в положение "термоЭДС ПТП";

- при достижении выставленных температур на стационарных теплообменниках определить значение величины термоЭДС термоэлектрического ПТП;

- переключить поочередно переключатель измерений в положение "Напряжение нагревателя горячего теплообменника" и "Ток нагревателя горячего теплообменника" и определить точные значения соответствующих электрических сигналов;

- определить мощность нагревателя из выражения:

$$W = U \cdot I ; \quad (2)$$

- определить вольт-ваттную чувствительность ν термоэлектрического ПТП по формуле:

$$\nu = \frac{E}{W}, \quad (3)$$

где E – термоЭДС.

Методика градуировки одновременно двух ПТП

Проведение парной градуировки двух термоэлектрических ПТП одновременно проводится лишь при измерениях одинаковых образцов. Такое парное измерение характеристик отличается от измерения одного ПТП лишь тем, что на горячем теплообменнике сверху размещают второй ПТП. Выводы второго ПТП присоединяются к соответствующим клеммам колодки на измерительном блоке 1 и измерение сигнала термоЭДС ПТП осуществляется при размещении в соответствующем положении переключателя измерений блока управления 2.

В этом случае на верхнем холодном теплообменнике задается на терморегуляторе такая же температура, как и на нижнем холодном теплообменнике.

Электрическая мощность, которая выделяется на горячем теплообменнике, распределяется пополам, проходит через два ПТП и рассеивается на двух холодных теплообменниках. Так как температуры горячих сторон каждого ПТП являются общими, а температуры холодных сторон одинаковые (поддерживаются терморегулятором), то вольт-ваттные чувствительности каждого ПТП можно высчитать с помощью следующих выражений:

$$\nu_1 = \frac{2 \cdot E_1}{W}, \quad (4)$$

$$\nu_2 = \frac{2 \cdot E_2}{W}, \quad (5)$$

где E_1 и E_2 – соответствующие значения термоЭДС первого и второго исследуемых ПТП. Число "2" в числителе перешло из знаменателя, потому что берется половинное значение мощности для каждого ПТП, то есть

$$W_1 = W_2 = \frac{W}{2}. \quad (6)$$

Результаты измерений параметров ПТП

За счет оптимизации геометрии полуэлементов термоэлектрических микробатарей ПТП были изготовлены экспериментальные образцы первичных преобразователей размерами $22 \times 22 \times 4$ мм усовершенствованной конструкции с повышенной чувствительностью и быстродействием (рис. 3). Метрологические характеристики (вольт-ваттная чувствительность, постоянная времени и т.п.) таких преобразователей были исследованы на разработанном стенде для градуировки ПТП по указанной выше методике.

Внешний вид таких экспериментальных образцов ПТП приведен на рис. 3.

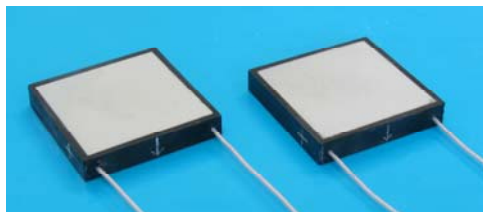


Рис. 3. Внешний вид экспериментальных образцов ПТП размерами $22 \times 22 \times 4$ мм.

Результаты измерений параметров двух экспериментальных образцов ПТП размерами $22 \times 22 \times 4$ мм приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты измерений параметров ПТП размерами $22 \times 22 \times 4$ мм

№	Название параметра	ПТП	
		№1	№2
1.	Диапазон тепловых потоков, Вт/м ²	$10^{-2} \div 10^3$	$10^{-2} \div 10^3$
2.	Чувствительность, В/Вт	1.48	1.51
3.	Постоянная времени, с	12	12
4.	Рабочий диапазон температур, °С	$-30 \div +130$	$-30 \div +130$
5.	Габаритные размеры ТЭБ, мм	$22 \times 22 \times 4$	$22 \times 22 \times 4$

Также была разработана конструкция нового типа термоэлектрических преобразователей, которые объединяют одновременное измерение температуры и теплового потока поверхности тела человека. Внешний вид экспериментальных образцов таких ПТП размерами $16 \times 16 \times 3$ мм приведен на рис. 4.

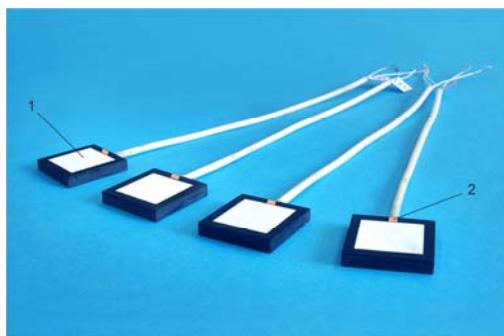


Рис. 4. Внешний вид экспериментальных образцов ПТП размерами $16 \times 16 \times 3$ мм:

1 – термоэлектрический сенсор теплового потока, 2 – датчик температуры.

Результаты измерения основных параметров четырех экспериментальных образцов ПТП размерами $16 \times 16 \times 3$ мм приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты измерений параметров ПТП размерами 16×16×3 мм

№	Название параметра	ПТП			
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
1.	Диапазон тепловых потоков, Вт/м ²	10 ⁻² ÷10 ³	10 ⁻² ÷10 ³	10 ⁻² ÷10 ³	10 ⁻² ÷10 ³
2.	Чувствительность, В/Вт	3.2	3.32	3.1	3.25
3.	Постоянная времени, с	10	11	11	10
4.	Габаритные размеры ТЭБ, мм	16×16×3	16×16×3	16×16×3	16×16×3

Временная характеристика таких термоэлектрических ПТП приведена на рис. 5.

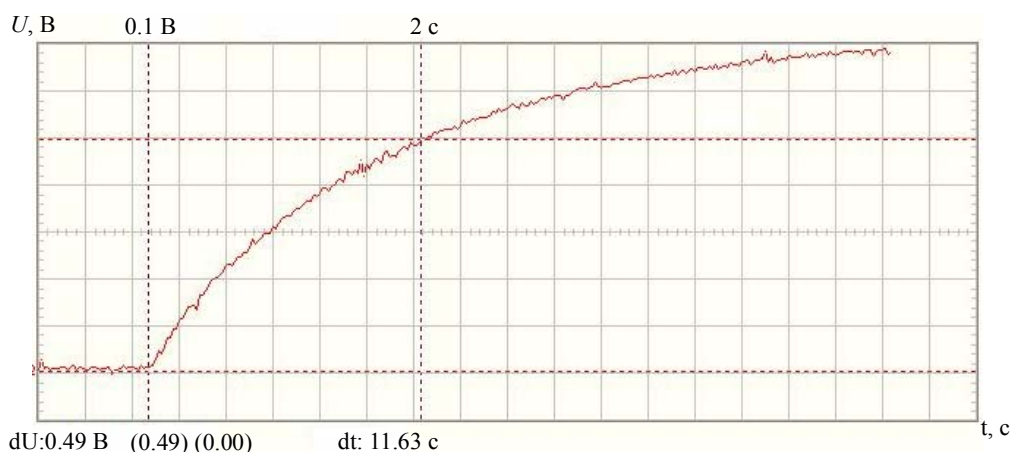


Рис. 5. Временная характеристика ПТП размерами 16×16×3 мм с керамической приемной поверхностью.

Таким образом, разработанный стенд для градуировки термоэлектрических ПТП дает возможность проводить исследование характеристик преобразователей и передавать результаты измерений на персональный компьютер в реальном времени. А разработанные термоэлектрические ПТП нового типа с одновременным измерением температуры и теплового потока дают возможность осуществлять мониторинг температурного и теплового состояний человека в реальном времени.

Выводы

1. Разработан и изготовлен стенд для градуировки термоэлектрических преобразователей теплового потока, который дает возможность исследовать метрологические характеристики преобразователей и передавать результаты измерений на персональный компьютер в реальном времени. Разработаны методики градуировки одного и одновременно двух термоэлектрических преобразователей теплового потока.
2. Разработан новый тип термоэлектрических преобразователей с одновременным измерением температуры и теплового потока, которые дают возможность осуществлять мониторинг температурного и теплового состояний человека в реальном времени.
3. Реализован усовершенствованный метод градуировки термоэлектрических сенсоров с использованием вспомогательного высокочувствительного преобразователя теплового потока, который дает возможность повысить точность экспериментального определения вольт-ваттной чувствительности таких сенсоров.

Литература

1. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник. Киев, 1979. 768 с.
2. Геращенко О.А. Основы теплотрии. Київ, 1971. 192 с.
3. Анатычук Л.И., Лусте О.Я. О предельных возможностях микрокалориметров. *ИФЖ*. 1978. 35. №4. С. 638 – 647.
4. Анатычук Л.И., Лусте О.Я. Микрокалориметрия. Львов, 1981. 160 с.
5. Анатычук Л.И., Лозинский Н.Г., Микитюк П.Д., Розвер Ю.Ю. Термоэлектрический полупроводниковый тепломер. *Приборы и техника эксперимента*. 1983. №5. С. 236.
6. Анатычук Л.И., Булат Л.П., Гуцал Д.Д., Мягкота А.П. Термоэлектрический тепломер. *Приборы и техника эксперимента*. 1989. №4. С. 248.
7. Геращенко О.А., Грищенко Т.Г., Декуша Л.В. Методика конструирования оптимальных преобразователей теплового потока. *Проблемы энергосбережения*. 1990. Вып.3. С. 36 – 42.
8. Анатычук Л.И., Демчук Б.Н., Лусте О.Я. Теория проектирования вихревых микрокалориметров. *Термоэлектричество*. 2002. №3. С. 18 – 27.
9. Демчук Б.Н., Лусте О.Я. Информационно-энергетическое описание термоэлектрических многоэлементных микробатарей. *Термоэлектричество*. 2003. №2. С. 48 – 50.
10. Ладыка Р.Б., Москаль Д.Н., Дидух В.Д. Полупроводниковые тепломеры в диагностике и лечении заболеваний суставов. *Медицинская техника*. 1992. №6. С. 34 – 35.
11. Ладыка Р.Б., Дакалюк О.Н., Булат Л.П., Мягкота А.П. Применение полупроводниковых тепломеров в диагностике и лечении. *Медицинская техника*. 1996. №6. С. 36 – 37.
12. Демчук Б.Н., Кушнерик Л.Я., Рубленик И.М. Термоэлектрические датчики для ортопедии. *Термоэлектричество*. 2002. №4. С. 80 – 85.
13. Ащеулов А.А., Кушнерик Л.Я. Термоэлектрический прибор для медико-биологической экспресс-диагностики. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2004. №4. С. 38 – 39.
14. Гищук В.С., Кобылянський Р.Р., Черкез Р.Г. Багатоканальний прилад для вимірювання температури і густини теплових потоків. *Науковий вісник Чернівецького університету: збірник наук. праць. Фізика. Електроніка*. 2014. Т3. Вип. 1. С. 96 – 100.
15. Кобылянський Р.Р., Бойчук В.В. Використання термоелектричних тепломірів у медичній діагностиці. *Науковий вісник Чернівецького університету: збірник наук. праць. Фізика. Електроніка*. 2015. Т4. Вип.1. С. 90 – 96.
16. Анатычук Л.И., Иващук А.И., Кобылянський Р.Р., Постевка И.Д., Бодяка В.Ю., Гушул И.Я. Термоэлектрический прибор для измерения температуры и плотности теплового потока "АЛТЕК-10008". *Термоэлектричество*. 2016. № 1. С. 80 – 88.
17. Лухтан Т.О., Коломієць Д.П., Ковтун С.І., Воробйов Л.Й. Метрологічна атестація термоелектричних перетворювачів теплового потоку. *Ukrainian Food Journal*. 2012. Т1. №3. С. 60 – 63.
18. Градування термоелектричних сенсорів теплового потоку. *Труди XV Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та електронні технології»* (26-30 травня, 2014 р. Одеса). Одеса. 2014. С. 30 – 31.
19. ГОСТ 25380-82. Метод измерения плотности тепловых потоков, проходящих через ограждающие конструкции. 1983.
20. ГОСТ 7076-99. Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме. 2000.
21. ДСТУ 3756-98. Перетворювачі теплового потоку термоелектричні загального призначення. 2000.

Поступила в редакцію 26.10.2016